

Hidrolik sıçramanın havalandırma verimliliğinin incelenmesi

Serhat KÜÇÜKALİ*, Şevket ÇOKGÖR

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Kıyı Bilimleri ve Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Doğal havalandırma, havadaki oksijenin suya olan transferi olarak tanımlanmaktadır. Doğal havalandırmayı sağlayan üç tane hidrodinamik süreç vardır: (1) hidrolik sıçrama, (2) su düşümü, (3) basamaklı kanallardan ilerleyen akım. Bu yapıların bir diğer ortak özelliği hidrolik yapılarda enerji kırıcı olarak kullanılmalarıdır. Bu noktadan hareketle, doğal havalandırma verimliliğiyle enerji kırılması arasında pozitif bir ilişkinin bulunması beklenmektedir. Bu çalışmada, bu hidrodinamik süreçlerden, hidrolik sıçrama olayı deneysel olarak incelenmiştir. Doğal havalandırmayı sağlayan bu hidrodinamik süreçlerde, termodinamiğin 1. prensibine dayanılarak, kaybolan enerjiden büyük ölçekli çevrilerin sorumlu olduğu ve bu çevrilerin yaptığı işin suya oksijen transferini sağlayan mekanizma olduğu yaklaşımda bulunulmuştur. Bu hipotezi desteklemek için laboratuvarında sistematik deneyler yapılmıştır. Deneyler, genişliği 0.5 m olan bir açık kanalda gerçekleştirilmiştir ve deneylerde $Fr_1 = 2.3 - 6.4$ arasında, ve $Re = 1.4 - 5.4 \times 10^4$ arasında değerler almıştır. Transfer olan oksijen miktarıyla, kırılan enerji miktarı arasında kuvvetli bir ilişki bulunmuştur. Deneysel verilerin analizi sonucu, hidrolik sıçramanın havalandırma verimliliğini yük kaybının ve birim genişlikten geçen debinin fonksiyonu olarak tahmin eden bir formül geliştirilmiştir. Havalandırma verimliliği yük kaybının $\frac{3}{4}$ 'üncü, birim genişlikten geçen debinin ise $\frac{1}{4}$ 'üncü kuvvetiyle ilişkilendirilmiştir. Hidrolik sıçrama boyunca akım doğrultusundaki türbülans şiddeti eksponansiyel olarak azalan, türbülans kinetik enerjisi ise lineer olarak azalan bir fonksiyon sergilemiştir ve bu gidiş hidrolik sıçramadaki hava konsantrasyonu dağılımıyla uyumaktadır. Elde edilen deneysel bulgular, hidrolik sıçramadaki yük kaybının, ortamdaki türbülans kinetik enerjisini temsil ettiğini işaret etmektedir ve bu süreç yüzey yenilenme teoremini desteklemektedir.

Anahtar Kelimeler: Doğal havalandırma, hidrolik sıçrama, su kalitesi, türbülans.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Serhat KÜÇÜKALİ. kucukali@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 68 48.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Kıyı Bilimleri ve Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Hidrolik sıçramanın havalandırma verimliliğinin incelenmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 05.04.2006 tarihinde dergiye ulaşmış, 11.04.2006 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.06.2007 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Investigation of hydraulic jump self-aeration process

Extended abstract

Hydraulic jump takes place at the transition from supercritical regime to subcritical regime and characterized by highly turbulent flow, macro-scale vortices, kinetic energy dissipation and bubbly two-phase flow due to air entrainment (Leutheusser et al. 1973; Hager 1992).

In the literature, studies about hydraulic jump aeration efficiency are very limited (Avery and Novak 1978; Wilhelms et al. 1981). The term self-aeration means transfer of oxygen from air towards water (Gulliver 1990) and it has important environmental and ecological implications for polluted streams. Aeration efficiency is calculated with a formula suggested by Gamenson (1957):

$$E = \frac{C_u - C_d}{C_s - C_u} = \frac{\text{Total oxygen transfer}}{\text{Potential maximum oxygen transfer}}$$

where, E denotes aeration efficiency which has a range between 0, for no aeration, and 1, for total downstream saturation. C_u and C_d are dissolved oxygen concentrations at the upstream and downstream of a hydraulic structure, respectively and C_s is the mass concentration of dissolved oxygen under saturated conditions.

Although, most of researches emphasized that turbulence structure is the main mechanism promoting to oxygen transfer, (Kobus 1991; Sene et al. 1994; Chanson 1996; Ervine 1998, El-Kamash et al. 2005) simultaneous measurements of turbulence quantities and dissolved oxygen are very limited. Indeed, hydrodynamic processes which ensure the self-aeration mechanism such as: (1) hydraulic jump, (2) plunging jet or water fall, and (3) stepped channels, have other common property: they are also used as energy dissipaters at hydraulic structures.

The aim of this experimental study is to investigate aeration performance of hydraulic jumps in terms of energy loss approach and to reveal the turbulence's important role in the process. Accordingly, experiments were carried out in a horizontal rectangular flume of glass sidewalls and concrete bottom 0.5 m wide, 0.45 m deep and 12.30 m long. Hydraulic jumps were generated downstream of a sluice gate placed 6.5 m distance from the beginning of the channel and location of the jumps were controlled by a tail gate installed at the outlet of the flume. Hy-

draulic jumps were grouped at seven different unit discharges with a range of $1.42 \times 10^{-2} \leq q \leq 5.28 \times 10^{-2} \text{ m}^2 / \text{s}$ and F_1 took values between 2.1-6.4. During the experiments, a digital video camera was employed to determine the hydraulic jump and roller lengths.

Dissolved oxygen (DO) measurements were conducted simultaneously at the upstream and downstream of the hydraulic jump with handheld oxygen meters (Model WTW Oxi 330i) which has a an accuracy of $\pm 0.5\%$ of oxygen concentration and $\pm 0.1\%$ of temperature in the range of 0-19.99 mg/L DO and -5 to +50 °C of temperature. The air calibration technique was used in the experiments and the sampling rate of the oxygen probe was 1 Hz. In order to drop the DO content of the approaching flow, sodium sulfide and cobalt chlorite as a catalyst were added into chamber.

Turbulence quantities were collected by a Nortek 10 Mhz type Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) at 25 Hz frequency for two minute sampling time. The root mean squares (RMS) of the turbulent fluctuation velocities $\sqrt{u'^2}$, $\sqrt{v'^2}$, and $\sqrt{w'^2}$ in the longitudinal, vertical and lateral directions, respectively, were determined by using WinADV32 software. Hydraulic jump turbulence structure was investigated at low Froude numbers: $F_1=1.9$ and $F_1=3$ because at higher Froude numbers, ADV does not make accurate measurements due to bubbly two-phase flow (Liu et al. 2004).

Aeration efficiency took values between 0.01-0.1 and a strong correlation was found between the aeration efficiency and head loss indicating the large-scale surface renewal eddy's dominant role in the process. It was found that aeration efficiency is in proportion to the $3/4$ power of head loss and $1/4$ power of unit discharge. Turbulent characteristics exhibit decreasing exponential function through the hydraulic jump and this trend matches with the air concentration distribution. Moreover, the data reveals that head loss term represents the degree of turbulence related with the macro-scale vortices occurred in the roller length region. These findings are in agreement with the surface renewal theory, which states that the rate of mass transfer is a function of the surface renewal which is ensured by large-scale organized eddy motions near the free surface.

Keywords: Self-aeration, hydraulic jump, energy dissipation, turbulence.

Giriş

Hidrolik sıçrama akımının sel rejiminden ($Fr > 1$) nehir rejimine ($Fr < 1$) geçişinde oluşur ve şiddetli türbülans, iki fazlı hava-su akımı, makro ölçekteki çevri hareketiyle karakterize edilir (Leutheusser vd., 1973; Hager, 1992). Serbest yüzeyli kanallarda akım rejimi Froude sayısına göre belirlenir:

$$Fr_1 = \frac{U}{\sqrt{gd}} \quad (1)$$

burada, U ve d sırasıyla akım hızını ve derinliğini, g ise yerçekimi ivmesini göstermektedir. Hidrolik sıçramanın olduğu bölgede, su yüzeyinde meydana gelen düzensizlikler, hava ile su arasında gaz transferine yol açar. Bu gazlardan biri olan oksijenin, havadan suya olan transferi doğal havalandırma olarak adlandırılır (Gulliver, 1990; Çokgör vd., 2003). Günümüzde, su kaynaklarında meydana gelen aşırı kirlenme neticesinde, doğal havalandırma sürecinin çevre sağlığı ve ekolojik açıdan önemli uygulama alanları bulunmaktadır (Çokgör ve Küçükali, 2004; Küçükali, 2005). Bir hidrolik yapıdaki doğal havalandırma verimliliği aşağıda verilen formülle göre hesaplanır (Gamenson, 1957):

$$E = \frac{C_u - C_d}{C_s - C_u} \quad (2)$$

burada, C_u , hidrolik yapı öncesindeki çözünmüş oksijen (ÇO) konsantrasyonunu, C_d hidrolik yapının çıkışındaki ÇO konsantrasyonunu, C_s ise sudaki doymuş haldeki ÇO konsantrasyonunu göstermektedir. E ise havalandırma verimliliğini temsil etmekte ve 0 ile 1 arasında değerler almaktadır.

Literatürde hidrolik sıçramanın akım özellikleri (hız profilleri, basınç çalkantıları) ve enerji kırılmasıyla ilgili birçok çalışma olmasına karşın (Hager, 1992), hidrolik sıçramanın doğal havalandırma verimliliğiyle ilgili çalışmalar oldukça kısıtlıdır. Hidrolik sıçramadaki havalandırma verimliliğini veren bağıntılarında, Fr_1 sayısı ile havalandırma verimliliği doğru orantılı olarak ilişkilendirilmiştir (Tablo 1). Ayrıca, Tabloda

E_{20} , 20°C sıcaklıktaki havalandırma verimliliğini, Re , Reynolds sayısını, ΔU hidrolik sıçrama öncesi ve sonrasındaki hız farkını, B kanal genişliğini ve q birim genişlikten geçen debiyi göstermektedir.

Literatürde birçok araştırmacı, oksijen transferinde türbülans yapısının önemli bir rolü olduğunu belirtmesine karşın (Kobus, 1991; Sene vd., 1994; Chanson, 1996; Irvine, 1998, El-Kamash vd., 2005), yapılan çalışmalarda eşzamanlı olarak çözünmüş oksijen (ÇO) konsantrasyonu ve türbülans büyüklükleri ölçümleri yapılmamıştır. Gerçekleştirilen bu deneysel çalışmanın amacı, hava-su kütle transferindeki türbülans yapısının önemli rolünü ortaya çıkarmak ve uygulamaya yönelik tasarımların gelişmesine katkıda bulunmaktır. Sunulan çalışmada, bir düşey kapağın altından geçen akımdan sonra oluşan hidrolik sıçramanın havalandırma verimliliği laboratuvarında yapılan sistematik ölçümlerle araştırılmıştır.

Tablo 1. Hidrolik sıçramanın havalandırma verimliliğini hesaplamada kullanılan formüller

Referans	Formül
Holler (1971)	$E_{20} = 1 - \frac{1}{1 + 0.0463\Delta U^2}$
Avery ve Novak (1978)	$E_{20} = \left(1 - \frac{1}{k'F_1^{2.1} Re^{0.75}}\right)^{1.115}$ ($k' \sim 1 - 1.6 \times 10^{-6}$)
Wilhelms ve diğerleri (1981)	$E_{20} = \left(1 - \frac{1}{4.924 \times 10^{-8} F_1^{2.106} Re^{1.034}}\right)^{1.115}$

Boyut analizi ve kuramsal yaklaşım

Hidrolik sıçramanın havalandırma verimliliğine etki eden parametreler şu fiziksel büyüklüklerle verilebilir:

$$E_{20} = f(d_1, d_2, U_1, B, k_s, \gamma, \nu, \sigma) \quad (3)$$

Burada, U_1 hidrolik sıçramadan önceki kesitsel

ortalama hızı, d_1 ve d_2 sıçramadan önce ve sonraki akım derinliklerini, k_s tabandaki pürüzlülük yüksekliğini, γ, ν, σ , sırasıyla akışkanın özgül ağırlığını, kinematik viskozitesini, ve yüzey gerilmesini temsil etmektedir. Yapılan araştırma pürüzsüz tabanda gerçekleştirildiği için k_s terimi ihmal edilmiş ve hidrolik sıçrama iki boyutlu olarak incelendiğinden B (kanal genişliği) terimi de dikkate alınmamıştır. Momentumun korunumu ve süreklilik denklemlerinden, hidrolik sıçramadaki yük kaybı:

$$\Delta H = \frac{(d_2 - d_1)^3}{4d_1d_2} \quad (4)$$

eşitliğiyle verilir. Bu çalışmada, hidrolik sıçramadan önce ve sonraki akım derinlik farklarını temsilen ΔH terimi kullanılacaktır. U_1 terimi yerine ise birim genişlikten geçen debi büyüklüğü kullanılacaktır. Buradan havalandırma verimliliği:

$$E_{20} = f(\Delta H, q, \gamma, \nu, \sigma) \quad (5)$$

şeklini alır. Termodinamiğin 1. prensibine dayanılarak ortamda kaybolan enerjinin büyük ölçekli çevrilerin yaptığı işe eşit olduğu yaklaşımında bulunulmuş ve havalandırma verimliliğinin yapılan bu işle doğru orantılı olduğu öne sürülmüştür.

$$E_{20} \propto \Delta H \times q \times \gamma \quad (6)$$

Ayrıca, suya transfer olan oksijenin miktarı akışkan özelliklerine de bağlıdır (Gameson, 1957; Kobus, 1991). Havadan suya oksijen transferinin gerçekleşebilmesi için yüzeysel gerilim kuvvetlerinin yenilmesi gerekir (Ervine, 1998). Buradan, $E_{20} \propto \frac{1}{\sigma}$ sonucuna ulaşılır.

Olaydaki etkin bir diğer akışkan özelliği ise viskozitedir. Viskozitenin artmasıyla, Reynolds sayısının değeri küçülür ve bu durum türbülans karakteristiklerinin küçülmesine yol açar (Wei ve Willmarth, 1989; Urban vd., 2005). Buradan, $E_{20} \propto \frac{1}{\nu}$ bulunur (Kobus, 1991). Ayrıca bu iki akışkan özelliği suyun kalitesinde temsil

eden büyüklüklerdir ve sudaki kirlilik arttıkça, bu büyüklüklerin değeri artar. Bu iki terimde (6) denkleminde yerine konulacak olursa:

$$E_{20} \propto \frac{q \times \Delta H \times \gamma}{\sigma \times \nu} \quad (7)$$

boyutsuz değişkeni elde edilir (birim genişlikteki kanal için). 20°C'de temiz bir suyun fiziksel özelliklerinin değerleri bellidir (Chanson, 1996):

$$\gamma = 9789 \text{ N} / \text{m}^3; \sigma = 0.0728 \text{ N} / \text{m}; \nu = 1.003 \times 10^{-6}$$

Bu değerler (7) denkleminde yerine konulacak olursa:

$$E_{20} \propto 13.4 \times 10^{10} \times Q \times \Delta H \quad (8)$$

bağıntısı elde edilir. Bu değişkenler arasında nasıl bir fonksiyonel ilişki olduğunu belirlemek amacıyla laboratuvarında sistematik deneyler gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca hidrolik sıçramanın havalandırma verimliliği, akımın kinetik enerjisini minimum yapma prensibine göre değerlendirilmiştir. Burada, Froude sayısı enerji terimleri cinsinden yazılacak olursa, Fr_1 sayısının karesinin kinetik enerjinin potansiyel enerjiye oranı olduğu görülür ve bu oran α simgesiyle gösterilmiştir:

$$Fr_1^2 = 2 \frac{1/2 U_1^2}{g d_1} = 2 \frac{\text{Kinetik enerji}}{\text{Potansiyel enerji}} = \alpha \quad (9)$$

Örnek olarak, Fr_1 sayısının dört olduğu durumda, akımın kinetik enerjisi potansiyel enerjisinden sekiz kat daha büyüktür. Hidrolik sıçramadan önceki yüksek kinetik enerji, sıçrama bölgesinde kırılmakta ve sıçramanın çıkışında potansiyel enerji kinetik enerjiden daha büyük olmaktadır. İşte bu süreç, termodinamiğin ikinci prensibiyle uyumaktadır. Bu prensibe göre doğadaki sistemler kinetik enerjilerini minimuma indirmeye eğilimindedirler. Termodinamiğin bu kanunu hidroliğin diğer kollarında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Örnek vermek gerekirse, Yalın ve Da Silva (2000) akarsularda oluşan

kıvrım geometrilerini, termodinamiğin ikinci prensibine dayandırarak Froude sayılarını minimum yapma eğiliminden oluştuğunu ve bu kıvrımlarda kaybolan enerjinin, akarsu yatağı ve kenarlarındaki sedimentin sökülmesi, taşınması gibi sistemin iç enerjisine dönüştüğünü ileri sürmüşlerdir. Bu çalışmada da, hidrolik sıçramanın havalandırma verimliliği, sıçramanın kinetik enerjisini minimuma indirmeye yaklaşımına göre incelenecektir.

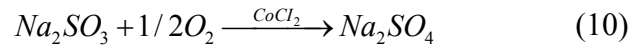
Deney sistemi ve ölçüm teknikleri

Bu çalışmanın deneyleri, İTÜ Hidrolik Laboratuvarı, Deney Salonu I'de gerçekleştirilmiştir. Deneyler 12.3 m uzunluğunda, 0.5 m genişliğinde ve 0.45 m yüksekliğinde tabanı beton, yan cidarları camla kaplı, dikdörtgen enkesitli ve yatay tabanlı bir açık kanalda gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Kanaldaki akımın debisi, kanal girişine yerleştirilmiş olan üçgen savakta tespit edilmiş; akım derinlikleri ise liminimetrelerin yardımıyla ölçülmüştür. Kanalda hidrolik sıçrama oluşturabilmek için, kanal başlangıcının 6.8 m mansap tarafına 50 × 40 cm² boyutlarında plexiglas malzemeden yapılmış bir düşey kapak ve kanal çıkışına da kontrol yapısı olarak ikinci bir düşey kapak yerleştirilmiştir. Suyun kenarlarından geçişini önlemek için, düşey kapağın kenarlarına 2 mm kalınlığında lastik contalar monte edilmiştir. Kapakların düşey yöndeki hareketi, kapak üzerlerine yerleştirilmiş sonsuz vida mekanizmayla sağlanmıştır. Kanalda oluşturulan hidrolik sıçramanın şiddeti, 1. düşey kapağın açıklığına bağlı olarak değişmektedir; çünkü 1. düşey kapak açıklığı, hidrolik sıçramadan önceki Froude sayısını (Fr_1) belirlemektedir.

Çözünmüş oksijen ölçümleri

Akım ortamındaki çözünmüş oksijen ve su sıcaklığı ölçümleri, hidrolik sıçramanın giriş ve çıkışına yerleştirilmiş olan iki adet WTW Oxi330i eltipi oksijenmetreler ile gerçekleştirilmiştir. Çözünmüş oksijen ölçümleri akım derinliklerinin orta noktalarında yapılmıştır. Oksijenmetreler kanal üzerine yerleştirilmiş olan konsola monte edilmiştir ve düşey hareketleri liminimetrelerle sağlanmıştır.

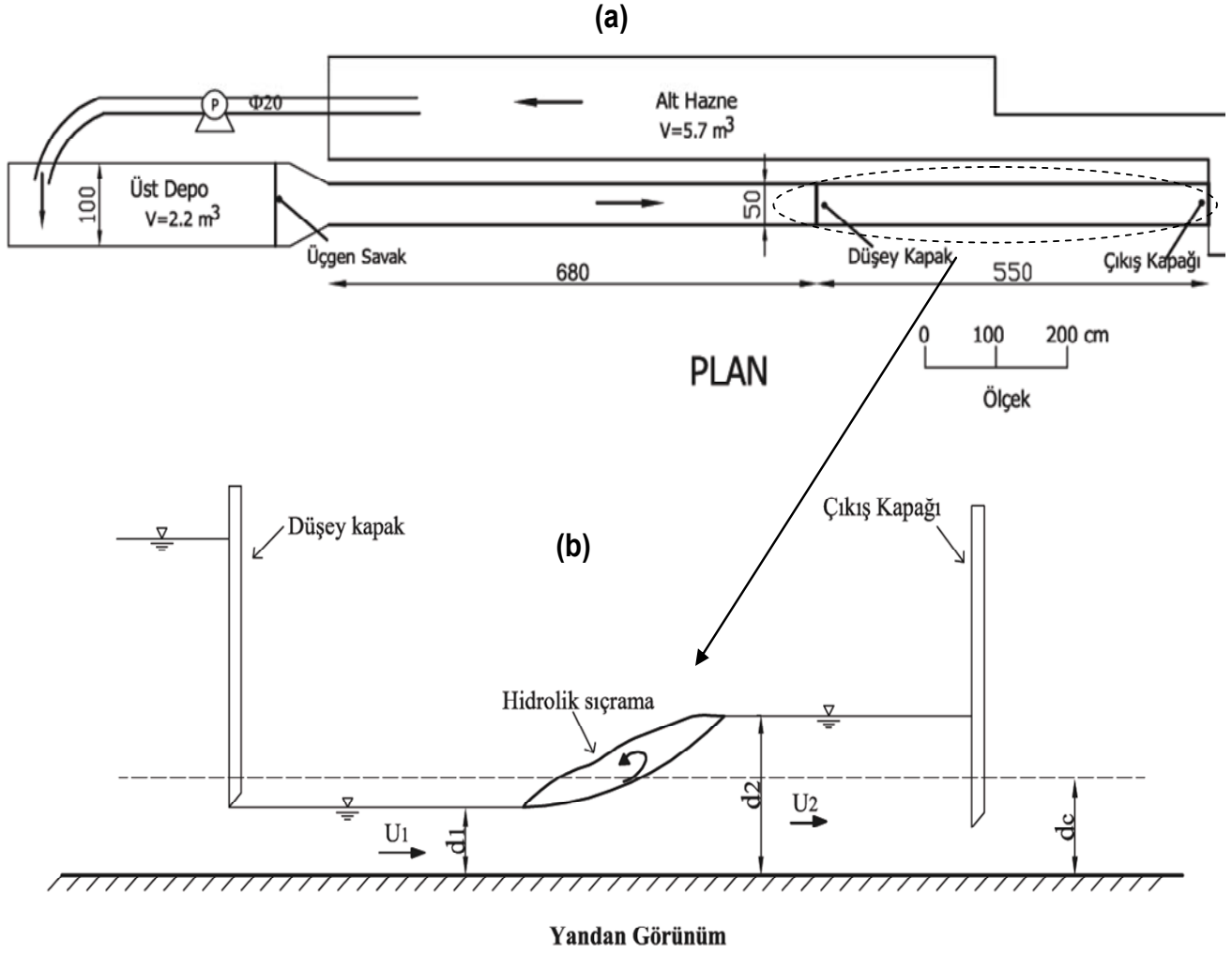
Her bir deneyden önce oksijenmetrenin kalibrasyonu üretici firma tarafından önerilen şartlara göre hava kalibrasyon aletinde yapılmış ve her iki oksijenmetrenin aynı değerleri gösterdiğinden emin olunduktan sonra deneylere başlanmıştır. Oksijenmetrenin ÇO için ölçüm aralığı ± 0.5 hassasiyetle 0-19.99 mg/L arasında, sıcaklık içinse ± 0.1 hassasiyetle -5 ile +50 °C arasında kalmaktadır. Oksijenmetrenin çalışma frekansı ise 1 Hz'dir ve oksijenmetre sensörünün çalışma prensibi ise membrandan difüze olan oksijenin katotda indirgenmesine dayanmaktadır. Hidrolik sıçramanın havalandırma verimliliğinin belirlenebilmesi için, gelen suyun ÇO konsantrasyonunun, sudaki doymuş değerinin altında olması gerekmektedir. Bu koşulu sağlayabilmek için, kanalın altındaki hazneye sodyum sülfür (Na_2SO_3) ve katilazör olarak kobalt klorit ($CoCl_2$) atılmıştır. Sodyum sülfür reaksiyon denklemi;



olarak verilir. Hidrolik sıçrama giriş ve çıkışındaki ÇO konsantrasyonları, su içerisinde doymuş değere ulaşıncaya kadar eşzamanlı olarak kaydedilmiştir. Deneylerde ölçülen bu değerlerin aritmetik ortalaması alınıp, o seri için gerekli olan havalandırma verimliliği katsayısı hesaplanmıştır.

Türbülans ölçümleri

Hidrolik sıçramanın düşük Froude sayılarındaki türbülans büyüklükleri, Nortek10 Mhz tipi Akustik Dopler Hızölçer (ADV) ile tespit edilmiştir. ADV 0.01-250 cm/s aralığında, ± 1 hassasiyetinde üç boyutlu hız ölçümleri yapılabilmekte ve saniyede 25 veri alınmaktadır. Yapılan deneylerde, hız ölçümleri her bir noktada 1 dakika süreyle kaydedilmiş ve 1500 hız değerinden oluşan zaman serileri elde edilmiştir. Ölçümlerde, u anlık hızı, \bar{u} zamansal ortalama hızı, u' çalkantı hızını göstermektedir. Bu değişkenler arasında $u = \bar{u} + u'$ bağıntısı vardır. Deneylerde kaydedilen bu zamansal hız serilerinden, çalkantı hızlarının karesel ortalamalarının karekökü $\sqrt{u'^2}$ (KOK) değeri ve türbülans kinetik enerjisi değeri her bir seri için elde edilmiştir.



Şekil 1. (a) Deney kanalının ölçekli olarak üstten görünümü; (b) deney kanalında oluşturulan hidrolik sıçramanın şematik olarak yandan gösterilmesi

DeneySEL bulgular ve tartışma

Hidrolik sıçramanın havalandırma verimliliği

Hidrolik sıçramanın havalandırma verimliliği, Fr_1 sayısının 2.1-6.5 aralığında değişim gösterdiği, yedi farklı debide gerçekleştirilen deney serileriyle araştırılmıştır. Bu çalışmada, d_1 hidrolik sıçramadan önceki akım derinliğini, U_1 hidrolik sıçramadan önceki ortalama akım hızını, d_2 hidrolik sıçramadan sonraki akım derinliğini, ΔH hidrolik sıçramada meydana gelen yük kaybını, X hidrolik sıçrama başlangıcının düşey kapağa olan yatay mesafesini, L_r çevrinti bölgesi uzunluğunu, L_j hidrolik sıçrama uzunluğunu, E_{20} 20°C için hesaplanmış olan havalandırma verimliliğini göstermektedir. Akımın sel rejiminden nehir rejimine geçişinde enerjinin bir

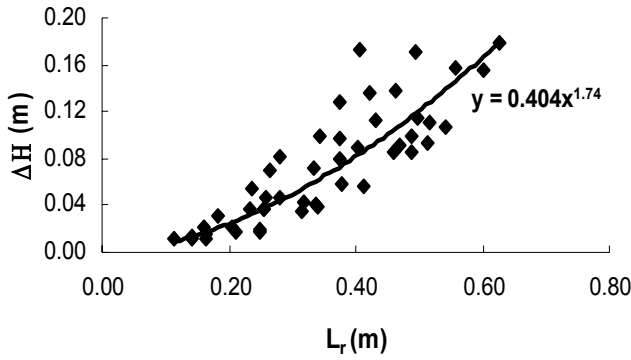
kısmı kırılır ve kırılan bu enerji miktarı:

$$\Delta H = \left(d_1 + \frac{U_1^2}{2g} \right) - \left(d_2 + \frac{U_2^2}{2g} \right) \quad (11)$$

formülünden hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen deneylerde enerji kırılmasını gösteren $\Delta H/H_1$ parametresi, %16 ile %63 aralığında değerler almıştır. Şekil 2’de hidrolik sıçramadaki yük kaybıyla çevrinti bölgesi uzunluğu arasındaki fonksiyonel ilişki incelenmiştir. Şekilden görüleceği üzere L_r ’nin az bir atışıyla, ΔH fazla bir şekilde artmaktadır. Bu noktaları en iyi biçimde temsil eden eğrinin fonksiyonu:

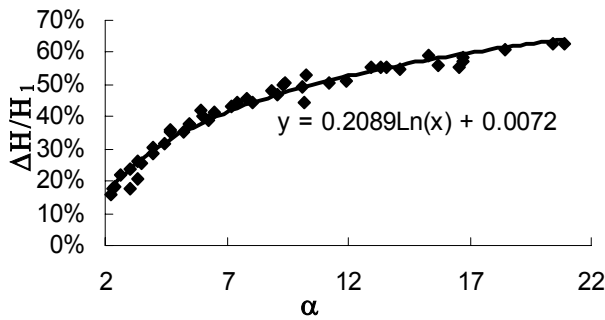
$$\Delta H = 0.404 L_r^{1.74} \quad (12)$$

denklemleriyle tanımlanmıştır. Bu eşitlik, hidrolik sıçramadaki enerji kırılmasının önemli derecede L_r 'ye bağlı olduğunu işaret etmektedir. Bunun sebebi, büyük ölçekli çevri ve girdapların çevrinti bölgesi uzunluğu içerisinde oluşup sonlanmasıdır. Bu çevri hareketi, ortamda ikincil akım oluşmasına sebep olur ve böylece yaratılan türbülansla akım enerjisinin bir kısmı ısıya dönüşür. Şekil 3'te rölatif enerji kırılmasının α katsayısıyla değişimi gösterilmiştir. Şekilden, görüleceği üzere, α sayısı arttıkça yüzdesel olarak kırılan enerji miktarı logaritmik olarak artmaktadır. Bu gidişte, hidrolik sıçramanın kinetik enerjisini minimuma indirme ilkesini desteklemektedir.



Şekil 2. Hidrolik sıçramadaki yük kaybının çevrinti bölgesi uzunluğuna göre değişimi

Bu çalışmadan beklenen, doğal havalandırma verimliliğiyle yük kaybı arasında fonksiyonel bir ilişkinin ortaya konmasıdır. Doğal havalandırmayı sağlayan üç tane önemli hidrodinamik süreç vardır, bunlar: hidrolik sıçrama, su düşümü ve kaskatlı akımlardır. Keza, bu süreçlerin bir diğer ortak özelliği hidrolik yapılarda enerji kırıcı olarak kullanılmalarıdır.

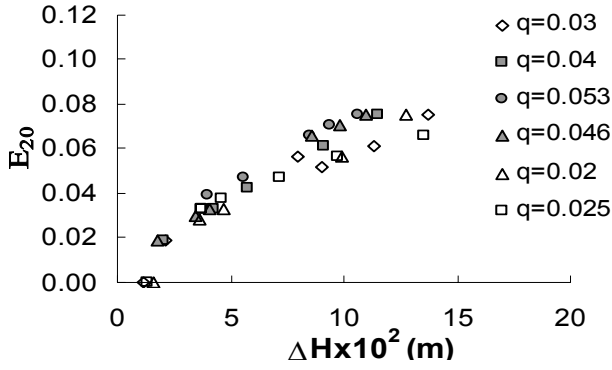


Şekil 3. Hidrolik sıçramadaki rölatif enerji kırılmasının α katsayısıyla değişimi

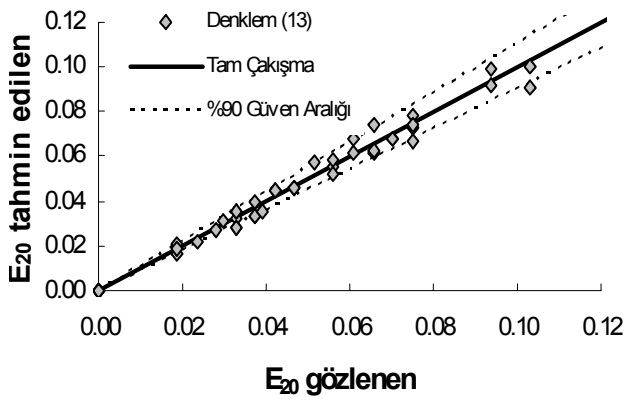
Bu noktadan hareketle, havalandırma verimliliğiyle yük kaybı arasında pozitif bir korelasyonun olması beklenmektedir. Bu pozitif korelasyon, elde edilen deneysel verilerin kartezyen koordinat takımına işaretlenmesiyle ortaya konmuştur (Şekil 4). Örnek vermek gerekirse, $q=0.03 \text{ m}^2/\text{s}$ koşulunda ΔH 'ın 9.02 cm 'den %90 artışla 17.2 cm 'e çıkmasıyla havalandırma verimliliği %100 artmıştır. Benzer şekilde, havalandırma verimliliğinin yük kaybıyla doğru orantılı olarak değiştiği Şekil 5'ten de görülmektedir. Şekil 4'e bakıldığında, E_{20} 'nin birinci derecede ΔH 'ın, ikinci derecede ise q 'nın fonksiyonu olduğu gözlenmektedir. Deneysel verilere çoklu regresyon analizi yöntemi uygulanarak ampirik bir formül geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada, ΔH ve q girdileri bağımsız değişkenler olarak ve E_{20} ise bağımlı değişken olarak alınmıştır. Deneysel verileri en iyi temsil eden eğrinin denklemi çoklu regresyon analiziyle kuvvet fonksiyonu olarak bulunmuş ve şu denklemle ifade edilmiştir:

$$E_{20} = 0.17q^{0.23}\Delta H^{0.74} \quad (13)$$

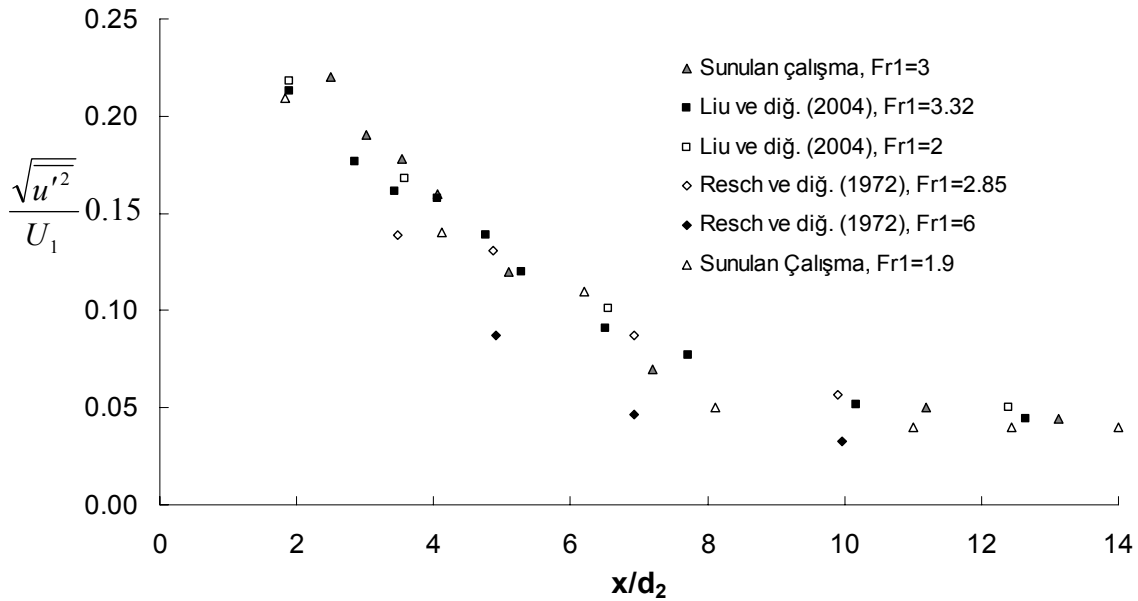
Bu denklem havalandırma verimliliğinin, birinci dereceden yük kaybının, ikinci dereceden ise birim genişlikten geçen debinin fonksiyonu olduğunu işaret etmektedir. Sonuçta, E_{20} 'nin ΔH 'ın $3/4$ 'üncü, q 'nın ise $1/4$ 'üncü üssüyle doğru orantılı olduğu bulunmuştur. Bu denklem deneysel verilerin işaret ettiği üzere $\Delta H \geq 1.7 \text{ cm}$ koşullarında geçerlidir. Şekil 5'te, geliştirilen formülün % 90 güven aralığında kalarak oldukça iyi tahmin yaptığı görülmektedir. Bu ampirik formül, şu bilgilerin ışığı altında açıklanacaktır: termodinamiğin birinci prensibine göre bir ortamdaki enerji kaybolmaz, ancak başka bir enerjiye dönüşür. Hidrolik sıçramada kırılan akım enerjisi, makro ölçekli çevrilerin ortamda türbülans yaratması ve oluşturulan bu türbülans kinetik enerjisinin küçük ölçekteki çevrilere iletilmesiyle ısıya dönüşür (Nezu, 2005). Akıma ters yöndeki bu vorteksler, havayı yakalayıp su içine emilmesini sağlarlar. Böylece, havadaki oksijenin suyun içine transferi gerçekleşmiş olur.



Şekil 4. Hidrolik sıçramadaki havalandırma verimliliğinin farklı debilerde yük kaybına göre değişimi



Şekil 5. Hidrolik sıçramadaki havalandırma verimliliğinin (13) denklemleriyle tahmin edilmesi



Şekil 6. Akım doğrultusundaki maksimum türbülans şiddetinin hidrolik sıçrama boyunca değişimi

Hidrolik sıçramanın türbülans yapısı

Doğal havalandırma süreciyle ilgili yapılan çalışmalarda, türbülans yapısının olay üzerindeki önemli bir etkisinin olduğu belirtilmesine karşın; Leutheusser ve diğerleri (1973), Ervine (1998) ve Sene ve diğerleri (1994) dışında yapılan çalışmalarda türbülans karakteristikleri ve havalandırma verimliliği eşzamanlı olarak ölçülmemiştir. Bu çalışmadan beklenen literatürdeki bu boşluğu doldurmak ve türbülansın olay üzerindeki etkisini açığa çıkarmaktır. Hidrolik sıçramanın türbülans yapısı, $Fr_1=1.9$ ve 3 sayılarında incelenmiştir. Yüksek Froude sayılarında, ortamdaki hava kabarcık miktarı arttığından ADV doğru sonuç vermemektedir. Bu yüzden düşük Froude sayılarında çalışılmıştır. Şekil 6'da akım doğrultusundaki türbülans şiddetinin x/d_2 boyunca değişimi, bu konuda yapılmış olan diğer çalışmalarla birlikte sunulmuştur. Şekil 6'ya bakıldığında, türbülans şiddetinin en büyük değerini hidrolik sıçrama başlangıcında aldığı ve hidrolik sıçrama bitişini temsil eden $x/d_2=6$ koordinatına kadar kademeli olarak azaldığı ve bu noktadan sonra sabitlendiği ve uniform bir dağılım sergilediği görülmektedir.

Grafik üzerine işaretlenen noktaların negatif eğimli bir eksponansiyel fonksiyonu temsil ettiği görülmektedir. Bu fonksiyonun denklemi:

$$\frac{\sqrt{u'^2}}{U_1} = 0.25 \exp(-0.144x/d_2) \quad (14)$$

şeklinde bulunmuştur. Resch ve diğerleri (1974), Liu ve diğerleri (2004) çalışmalarında da en büyük türbülans karakteristikleri hidrolik sıçramanın başlangıcında gözlenmiştir. Makro ölçekteki çevrilerin ortaya çıkardığı bu türbülans kinetik enerjisi, küçük ölçekteki çevrilere iletilerek, akımın enerjisinin ısıya dönüşmesine yol açar. Bu fiziksel süreç ise hidrolik sıçramanın hidrolik yapılarda etkin bir enerji kırıcı olarak kullanılmasını sağlamaktadır.

Ayrıca, hidrolik sıçrama başlangıcında gerçekleşen en büyük türbülans şiddeti, suya hava girişini tetikleyen mekanizmadır ve yapılan çalışmalarda en büyük hava miktarı bu noktada gözlenmiştir (Rajaratnam, 1961; Chanson, 1996).

Sunulan çalışma ve literatürdeki hidrolik sıçramanın türbülans yapısıyla ilgili sunulan diğer çalışmalar (Rouse vd., 1959; Resch vd., 1972; Liu vd., 2004), türbülans şiddetinin hidrolik sıçrama başlangıcından sonuna ve kanal tabanından yüzeye doğru azaldığını ortaya koymaktadır. Benzer eğilim hidrolik sıçrama içersindeki hava miktarı dağılımı için de geçerlidir. Hidrolik sıçrama boyunca ve tabandan yüzeye doğru

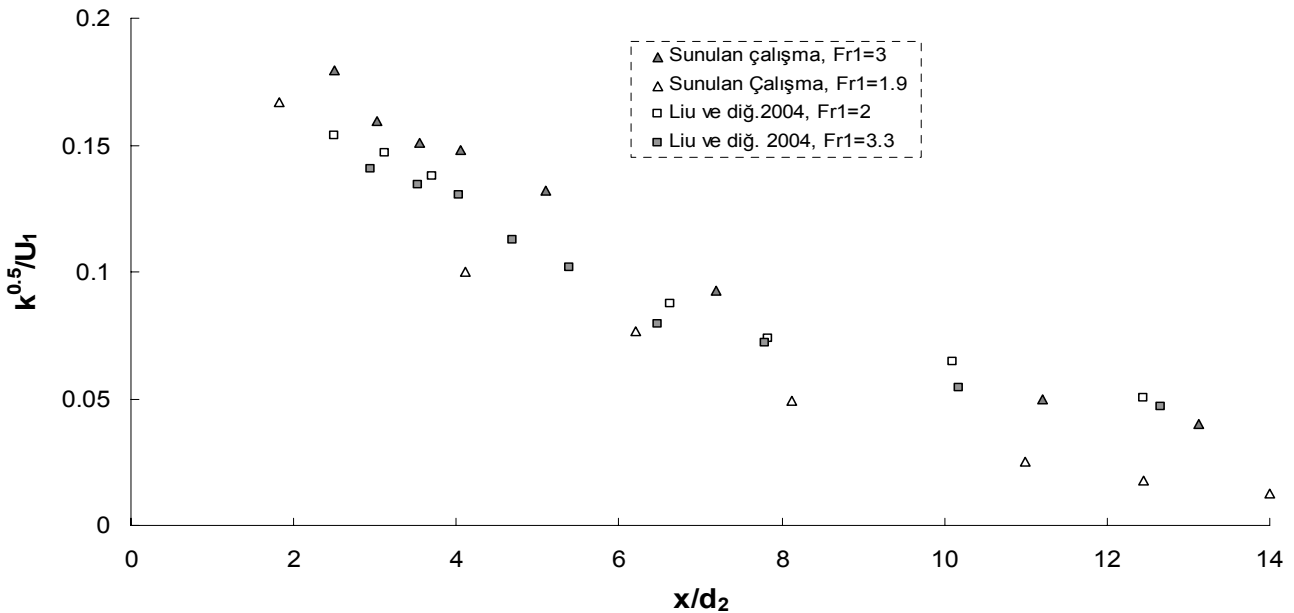
akım içersindeki hava miktarı azalmaktadır (Rajaratnam, 1961). Chanson (1996) hidrolik sıçrama alanı içersindeki hava miktarı dağılımını:

$$C_{mak} \approx k_1 \times \left(\frac{x}{d_1}\right)^{-0.54} \quad (15)$$

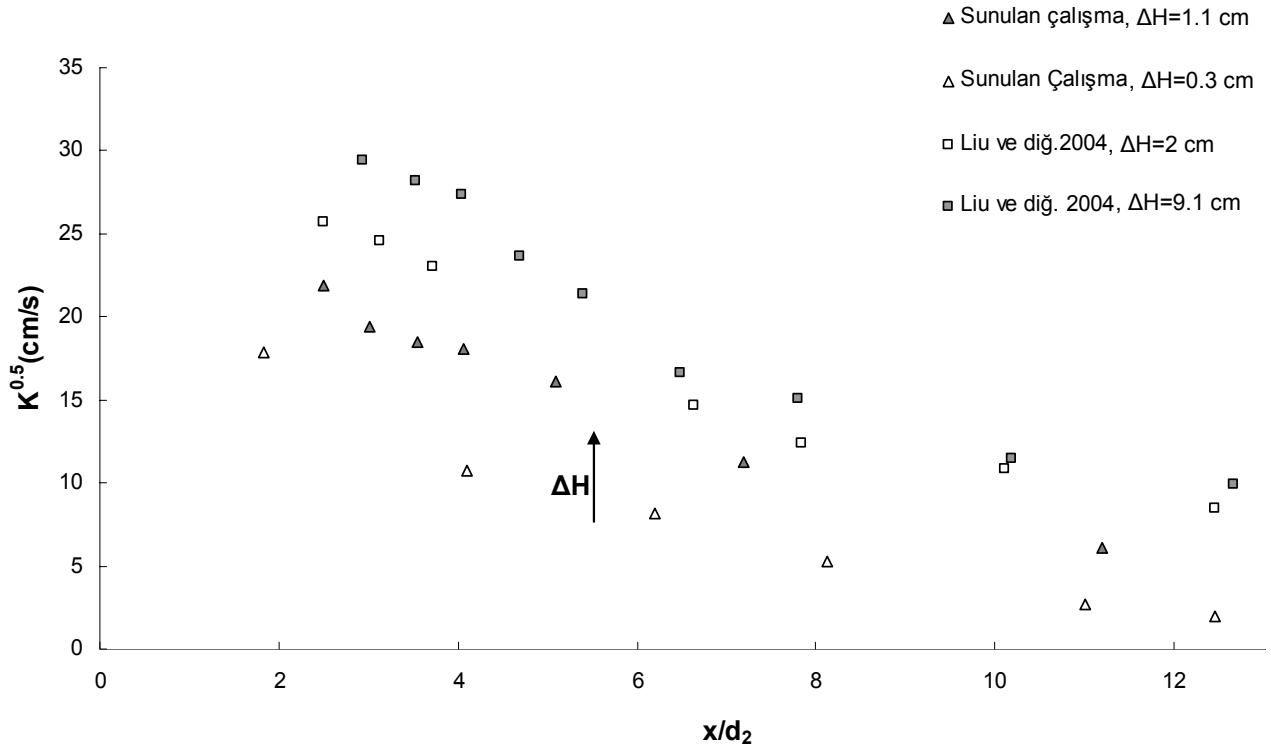
bağıntısıyla tanımlamıştır. Burada C_{mak} ilgili kesitte derinlik boyunca ölçülen en büyük hava miktarını, k_1 bir sabiti göstermektedir. (14) denkleminde temsil edildiği gibi türbülans karakteristikleri gibi su içindeki hava miktarı hidrolik sıçrama boyunca benzer eğilimi göstererek üssel olarak azalmaktadır. Bu iki denklem türbülans karakteristikleriyle havalandırma verimliliği arasındaki pozitif korelasyonu yansıtmaktadır. Şekil 7'de boyutsuzlaştırılmış türbülans kinetik enerjisinin hidrolik sıçrama boyuncaki değişimi Liu ve diğerleri (2004) çalışmasıyla birlikte sunulmuştur. Türbülans kinetik enerjisi:

$$K = (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) / 2 \quad (16)$$

denklemleriyle hesaplanmıştır. Hidrolik sıçrama boyunca türbülans kinetik enerjisinin lineer olarak azaldığı görülmektedir (Şekil 8). Bu fonksiyonel ilişki Liu ve diğerleri (2004) tarafından da saptanmıştır. Bu fonksiyonel ilişki şu matematiksel denklemle ifade edilmiştir:



Şekil 7. Boyutsuzlaştırılmış türbülans kinetik enerjisinin hidrolik sıçrama boyunca değişimi



Şekil 8. Türbülans kinetik enerjisinin hidrolik sıçrama boyunca değişimi

$$\frac{K^{1/2}}{U_1} = -0.012x/d_2 + 0.2 \quad (17)$$

Şekil 8’de, hesaplanmış olan türbülans karakteristikleri boyutlu olarak sunulmuştur. Şekil 8’den görüleceği üzere türbülans kinetik enerjisinin değeri arttıkça yük kaybı artmaktadır. Dolayısıyla, havalandırma verimliliğiyle ilişkilendirilen yük kaybının türbülans kinetik enerjisini, bir başka deyişle makro ölçekli çevrilerin yaptığı işi temsil ettiği Şekil 8’de net bir şekilde ortaya konmuştur. Hidrolik sıçrama başlangıcındaki türbülans kinetik enerjisinin 17 cm/s’den 29.5 cm/s’ye çıkışıyla, yük kaybı 1.1 cm’den 9.1 cm’e yükselmiştir. Benzer şekilde Resch ve diğerleri (1974) çalışmasında Fr_1 ’in 2.85’ten 6’ya çıkmasıyla $x/d_2=2$ koordinatındaki akım doğrultusundaki türbülans hızı %172 artarak 0.25 m/s’den 0.68 m/s’ye çıkmıştır.

Bu çalışmada havalandırma verimliliğiyle ilişkilendirilen yük kaybı aslında ortamdaki türbülans büyüklüklerinin bir göstergesidir. Akım alanındaki türbülans kinetik enerjisinin artması, su yüzeyinde oluşturduğu düzensizliklerle hava-su girişim alanının büyümesine, dolayısıyla küt-

le transferinin artışına yol açar. Böylece, ΔH ile havalandırma verimliliği arasındaki doğrusal ilişkinin nedeni ortaya konmuştur. Ayrıca, oksijen transferiyle yük kaybı arasındaki pozitif ilişki, yüzey yenilenme teoremiyle de uyusmaktadır. Teoriye göre, serbest su yüzeyi türbülans girdaplarıyla sürekli olarak belirli periyotlarda yenilenmekte ve su içine transfer olan kütlenin miktarı bu yenilenme frekansı ile doğru orantılı olarak artmaktadır.

Sonuçlar

Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Hidrolik sıçramanın havalandırma verimliliğini, yük kaybının ve birim genişlikten geçen debinin fonksiyonu olarak tahmin eden, yeni bir ampirik formül geliştirilmiştir. Elde edilen bu formül savakta yapılan ölçümlerde de uygulandığında %90 güven aralığında tutarlı sonuçlar vermiştir.
- Akım doğrultusundaki türbülans şiddetinin hidrolik sıçrama alanı içinde eksponansiyel olarak azaldığı; buna karşın türbülans kinetik enerjisinin ise lineer olarak azaldığı gösterilmiştir. Bu süreçleri ifade eden denklemler ortaya konmuştur.

- Geliştirilen ampirik formüldeki yük kaybının, elde edilen verilere ve diğer çalışmalara dayanılarak, ortamdaki türbülans kinetik enerjisini temsil ettiği yaklaşımında bulunulmuştur.

Kaynaklar

- Avery, S. T. ve Novak, P., (1978). Oxygen transfer at hydraulic structures, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, **104**, 11, 1521-1540.
- Chanson, H., (1996). *Air bubble entrainment in free-surface turbulent shear flows*, 1st Ed., Academic Press, San Diego.
- Çokgör, S., Küçükali, S., Diplas, P., (2003). Oxygen transfer around boulders, Proc., 30th IAHR Congress Conf., IAHR, Thessaloniki, Greece, Theme C, 219-226.
- Çokgör, S., Küçükali, S., (2004). Oxygen transfer in flow around and over stones placed in a laboratory flume, *Ecological Engineering*, **23**, 3, 205-219.
- Ervine, D. A., (1998). Air entrainment in hydraulic structures: a review, *Water Management*, **130**, 5, 142-153.
- El-Kamash, M.K., Loewen, M.R., Rajaratnam, N., (2005). An experimental investigation of jet flow on stepped chute, *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, **43**, 1, 31-43.
- Gamenson, A.L.H., (1957). Weirs and aeration of rivers, *Journal of Institution Water Engineers*, **11**, 5, 477-490.
- Gulliver, J. S., (1990). Introduction to air-water mass transfer, Proc., 2nd Int. Symp. on Gas Transfer at Water Surfaces, Air-Water Mass Transfer, S. C. Wilhelms and J. S. Gulliver, eds., ASCE, Minneapolis, 1-7.
- Gulliver, J. S., ve Rindels, A. J., (1993). Measurement of air-water oxygen transfer at hydraulic structures, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 119(3), 327-349.
- Gulliver, J.S., Wilhelms S. C., ve Parkhill K.L., (1998). Predictive capabilities in oxygen transfer at hydraulic structures, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, **124**, 7, 664-671.
- Hager, W.H. (1992). *Energy dissipaters and hydraulic jump*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Holler, A.G., (1971). The mechanism describing oxygen transfer from the atmosphere to discharge through hydraulic structures. Proc., 14th IAHR Congress and Conf., Paris, France, 372-382.
- Kobus, H., (1991). Introduction to air-water flows, *Air entrainment in free surface flows*, I. R. Wood, ed., *IAHR Hydraulic Structures Manual*, No. 4, Rotterdam.
- Küçükali, S., (2005). Local Dissolved Oxygen Variations in the vicinity of Different Boulder Arrangements Placed in a Flume, XXXI IAHR Congress, John Kennedy Student Paper Competition, Seoul, South Korea.
- Leutheusser, H.J., Resch, F.J., ve Alemu, S., (1973). Water quality enhancement through hydraulic aeration, XV IAHR Congress, Istanbul, Turkey, Vol. 2, 167-175.
- Liu, M., Rajaratnam, N., Zhu, D.Z., (2004). Turbulence structure of hydraulic jumps of low froude numbers, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, **130**, 6, 511-520.
- Nezu, I., (2005). Open-channel flow turbulence and its research prospect in the 21st century, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, **131**, 4, 229-246.
- Rajaratnam, N. (1961). An experimental study of air entrainment characteristics of hdraulic jump, *Journal Institution of Engineers (India)*, **42**, 247-273.
- Resch, F. J., ve Leutheusser, H. J., (1972). Reynolds stress measurements in hydraulic jumps, *Journal of Hydraulic Research*, **10**, 4, 409-429.
- Resch, F.J., ve Leutheusser, H.J., ve Alemu, S. (1974). Bubbly two-phase flow in hydraulic jump, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, **100**, 137-149.
- Rouse, H., Siao, T.T., ve Nagaratnam, S. (1959). Turbulence characteristics of the hydraulic jump, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, **124**, 926-966.
- Sene, K.J., Hunt, J. C. R. ve Thomas, N.H., (1994). The role of coherent structures in bubble transport by turbulent shear flows, *Journal of Fluid Mechanics*, **259**, 219-240.
- Urban, A.L., Wilhelms, S.C., Gulliver, J.S., (2005). Decay of turbulence downstream of a stilling basin, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, **131**, 9, 825-829.
- Wei, T. ve Willmarth, W.W., 1989. Reynolds-number effects on the structure of a turbulent channel flow, *Journal of Fluid Mechanics*, **204**, 57-95.
- Wilhelms, S.C., Clark, L., Wallace, J.R., ve Smith, D.R., (1981). Gas transfer in hydraulic jumps. Technical Report E-81-10, US Army Engineer Waterways Experiment Station, CE, Vicksburg Miss., USA.
- Yalin, M.S. ve Da Silva, A.M.F., (2000). Computation of regime characteristics on thermodynamic basis, *Journal of Hydraulic Research*, **38**, 1, 57-63.